

Поиск солнечных аксионов с энергией 5.5 MeV с детектором Borexino

© А.В. Дербин, И.С. Драчнев, И.С. Ломская, В.Н. Муратова, Н.В. Ниязова, Д.А. Семенов, Е.В. Унжаков

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Гатчина, Ленинградская обл., Россия

E-mail: drachnev_is@pnpi.nrcki.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 6 августа 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Определена чувствительность большого сцинтилляционного детектора Borexino к поиску аксионов с энергией 5.5 MeV, возникающих в ядерной реакции $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + A$ на Солнце, с помощью комптоновского процесса и конверсии аксиона в фотон в поле ядра. На основе измеренного спектра Borexino установлены новые верхние пределы на произведение константы связи аксиона с электроном и нуклонами $|g_{Ae}g_{AN}^3| \leq 4.6 \cdot 10^{13}$ и с фотоном и нуклонами $|g_{Ay}g_{AN}^3| \leq 3.6 \cdot 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$, оба предела для 90% уровня достоверности.

Ключевые слова: солнечные аксионы, темная материя, аксионоподобные частицы.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59388.6381k

Аксион — гипотетический нambu-голдстоуновский бозон поля, введенный для решения проблемы сохранения CP -четности в сильном взаимодействии, выражающейся, в частности, в аномально малом дипольном моменте нейтрона [1–3]. Если аксион существует, то Солнце будет мощным источником этих частиц, в том числе рожденных и в ядерных переходах магнитного типа. Такой переход с энергией 5.49 MeV присутствует среди реакций протон-протонной цепочки, производящей большую часть солнечной энергии, это реакция слияния $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + A$. Поток аксионов с энергией 5.5 MeV оказывается пропорциональным потоку солнечных pp -нейтрино, производящихся в той же цепочке реакций, известному с высокой точностью. Коэффициент пропорциональности зависит от изоскалярной (g_{AN}^0) и изовекторной (g_{AN}^3) констант связи аксиона с нуклоном. В численном виде поток солнечных аксионов на Земле выглядит как [4]:

$$\Phi_A = \Phi_{pp} \cdot 3.23 \cdot 10^{10} (g_{AN}^3)^2 (p_A/p_\gamma)^3, \quad (1)$$

где $\Phi_{pp} = 6 \cdot 10^{10} \nu \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ — поток солнечных pp -нейтрино, p_A и p_γ — импульсы аксиона и фотона соответственно. Масса аксиона, к которой чувствителен поиск данной реакции, может доходить до 5 MeV.

Поток солнечных аксионов может быть зарегистрирован при конверсии аксиона в фотон в поле ядра $A + Z \rightarrow \gamma + Z$, при распаде аксиона на два фотона $A \rightarrow \gamma\gamma$, в реакции аксиоэлектрического эффекта $A + e^- + Z \rightarrow e^- + Z$ и в комптоновском процессе $A + e^- \rightarrow e^- + \gamma$. В настоящей работе рассматриваются только конверсия аксиона в поле ядра, аналогичная примаковской конверсии π^0 -мезона, и комптоновская конверсия на электроны. В обоих случаях в конечном состоянии оказываются две частицы с суммарной энергией 5.5 MeV.

Интегральное сечение комптоновского процесса имеет сложный вид и зависит от константы связи аксиона с

электроном g_{Ae}^2 , массы m_A и энергии E_A аксиона [5]. Для относительно легких аксионов (с массой менее 1 MeV) и при энергии аксиона более 5 MeV сечение почти не зависит от энергии аксиона и составляет

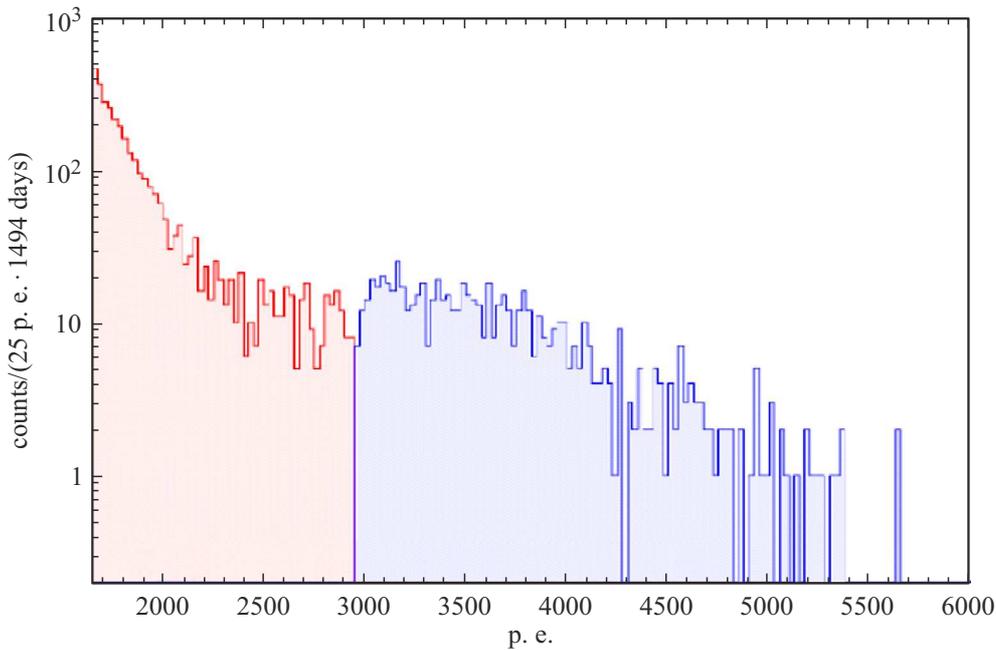
$$\sigma_{CC} \cong g_{Ae}^2 \cdot 4.3 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2. \quad (2)$$

Сечение конверсии аксиона в фотон в поле ядра в случае органического сцинтиллятора $A + {}^{12}\text{C} \rightarrow \gamma + {}^{12}\text{C}$ зависит от константы связи аксиона с фотоном g_{Ay}^2 :

$$\sigma_{PC} = g_{Ay}^2 \frac{\alpha Z^2}{2} \left[\frac{1 + \beta^2}{2\beta^2} \ln \left(\frac{1 + \beta^2}{1 - \beta^2} \right) - \frac{1}{\beta} \right].$$

Здесь Z — заряд ядра, $\alpha = 1/137$ — постоянная тонкой структуры, $\beta = p_A/E_A$ — скорость аксиона [6]. Поток аксионов, летящих от Солнца, ослабляется из-за распада на два гамма-кванта, что должно быть учтено при регистрации аксионов посредством реакции конверсии в поле ядра.

В настоящей работе выполнен поиск аксиона с энергией 5.5 MeV с использованием данных детектора Borexino — сверхчистого низкофонового жидкостного сцинтилляционного детектора, ориентированного в первую очередь на регистрацию солнечных нейтрино [7]. Детектор представляет собой четырехслойную конструкцию, состоящую из внешнего водного бака диаметром 15.7 м и высотой 16.5 м, который просматривается 208 фотоэлектронными умножителями и используется как мюонное вето, внутри которого размещена стальная сфера диаметром 13.7 м. Жидкий сцинтиллятор на основе псевдокумола массой 278 т находится внутри тонкой нейлоновой сферы, которая окружена concentрическим буферным слоем псевдокумола с гасящей присадкой толщиной 2.6 м. Сфера просматривается 2212 фотоэлектронными умножителями, которые обеспечивают энергетическое разрешение 5% и пространственное разрешение 13 см при энергии 1 MeV. Сцинтиллятор



Спектр детектора Bogexino в интервале 3.4–12 MeV, измеренный за 1494 суток.

был подвергнут беспрецедентной процедуре очистки с достижением уровней на десять порядков ниже уровня естественной радиоактивности.

Поиск аксиона производился по данным, набранным с января 2008 г. по декабрь 2016 г., включающим в себя 1494 дня живого времени, которые были опубликованы в работе [8]. На рисунке показан спектр событий после ряда отборов, которые описаны в [8]. По оси абсцисс отложено число регистрируемых фотоэлектронов (p.e.) N_{pe} , которое связано с энергией события соотношением $E[\text{MeV}] = N_{pe}/500$ для 2000 регистрирующих фотоумножителей. Спектр получен для всего активного объема детектора, заключенного внутри нейлоновой сферы. При энергиях, соответствующих N_{pe} ниже 2950 p.e., отбрасывались события, удаленные вверх от центра детектора более чем на 2.5 m по вертикали, что приводит к скачку количества выбранных событий в этой точке. Полная активная масса детектора составила 266 ± 5.3 t для низкоэнергетической области, определенная доля объема оказалась равна $\epsilon = 0.857 \pm 0.006$.

Для аксионов с энергией 5.5 MeV, вызвавших реакции конверсии аксиона в фотон, можно ожидать отклик детектора, близкий к моноэнергетическому пику с соответствующей энергией. С учетом указанного световыхода и энергетического разрешения, несколько уширенного неоднородностью сбора светового сигнала, следует ожидать появление гауссова пика с положением $x_0 = 2740$ p.e. и дисперсией $\sigma = 60$ p.e., определенной посредством масштабирования энергетического разрешения детектора с учетом корневой зависимости от энергии. Статистически значимого пика с такими параметрами не наблюдается. С учетом того, что скорость

счета фоновых событий в области 2500–4000 p.e. слабо зависит от энергии (см. рисунок), можно применить широко используемый 3.3σ -метод для определения верхнего предела числа событий в гауссовом пике. Консервативно предполагая, что уровень фона при энергии 5.5 MeV составляет одно событие на фотоэлектрон, можно определить верхний предел на число событий в пике $S_{lim} = 25$ отсчетов для 90% уровня достоверности (confidence level, CL).

Ожидаемое число зарегистрированных аксионов S в реакции комптоновской конверсии определяется как

$$S = \sigma_{CC} \Phi_A T N_e \epsilon. \quad (3)$$

Здесь N_e — число электронов в объеме детектора, T — время измерений. Условие ($S \leq S_{lim}$) вместе с выражениями (1) и (2) позволяет ограничить сверху произведение констант g_{Ae}^2 и $(g_{AN}^3)^2$

$$|g_{Ae} g_{AN}^3| \leq 4.6 \cdot 10^{-13} (90\% \text{CL}). \quad (4)$$

Для реакции конверсии аксионов в фотон в поле ядра ^{12}C вычисления по формуле (3) с заменой N_e на число ядер углерода $N_{^{12}\text{C}}$ и σ_{CC} на сечение σ_{PC} приводят к следующему результату для константы g_{Ay} :

$$|g_{Ay} g_{AN}^3| \leq 3.6 \cdot 10^{-11} \text{ GeV}^{-1} \quad (5)$$

(также для 90% уровня достоверности). Оба ограничения (4) и (5) получены в предположении $(p_A/p_\gamma)^{3/2} \approx 1$, что справедливо для масс аксиона менее 1 MeV. Найденные ограничения находятся на уровне лучших результатов, достигнутых в экспериментах на реакторах и ускорителях [9], и позволяют уточнить предыдущие

результаты, полученные с использованием детектора Borexino [4]. Более того, установленные пределы исключают существенную область возможных значений констант g_{Ae} и $g_{A\gamma}$ в моделях с аксиноподобными частицами с массой в области 1 MeV [10,11].

Таким образом, проведен поиск сигналов реакций с участием аксиона на основе данных детектора Borexino. Измеренный спектр детектора оказался статистически совместим с известными фоновыми компонентами. В результате получены новые ограничения на константы связи аксиона с электроном и нуклонами и константы связи аксиона с фотонами и нуклонами: $|g_{Ae}g_{AN}^3| \leq 4.6 \cdot 10^{-13}$ и $|g_{A\gamma}g_{AN}^3| \leq 3.6 \cdot 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$, все для 90% уровня достоверности.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-12-00046).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Weinberg, Phys. Rev. Lett., **40**, 223 (1978). DOI: 10.1103/PhysRevLett.40.223
- [2] F. Wilczek, Phys. Rev. Lett., **40**, 279 (1978). DOI: 10.1103/PhysRevLett.40.279
- [3] R.D. Peccei, H.R. Quinn, Phys. Rev. Lett., **38**, 1440 (1977). DOI: 10.1103/PhysRevLett.38.1440
- [4] G. Bellini, J. Benziger, D. Bick, G. Bonfini, D. Bravo, M. Buizza Avanzini, B. Caccianiga, L. Cadonati, F. Calaprice, C. Carraro, P. Cavalcante, A. Chavarria, D.D. Angelo, S. Davini, A. Derbin et al. (Borexino Collaboration), Phys. Rev. D, **85**, 092003 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevD.85.092003
- [5] A.R. Zhitnitsky, Yu.I. Skovpen, Sov. J. Nucl. Phys., **29**, 513 (1979).
- [6] F.T. Avignone III, C. Baktash, W.C. Barker, F.P. Calaprice, R.W. Dunford, W.C. Haxton, D. Kahana, R.T. Kouzes, H.S. Miley, D.M. Moltz, Phys. Rev. D, **37**, 618 (1988). DOI: 10.1103/PhysRevD.37.618
- [7] G. Alimonti, C. Arpesella, H. Back, M. Balata, T. Beau, G. Bellini, J. Benziger, S. Bonetti, A. Brigatti, B. Caccianiga, L. Cadonati, F. Calaprice, G. Cecchet, M. Chen, A. DeBari et al. (Borexino Collaboration), Astropart. Phys., **16**, 205 (2002). DOI: 10.1016/S0927-6505(01)00110-4
- [8] M. Agostini, K. Altenmüller, S. Appel, V. Atroshchenko, Z. Bagdasarian, D. Basilico, G. Bellini, J. Benziger, D. Bick, D. Bravo, B. Caccianiga, F. Calaprice, A. Caminata, P. Cavalcante, A. Chepurinov et al. (Borexino Collaboration), Phys. Rev. D, **101**, 062001 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevD.101.062001
- [9] P.A. Zyla, R.M. Barnett, J. Beringer, O. Dahl, D.A. Dwyer, D.E. Groom, C.-J. Lin, K.S. Lugovsky, E. Pianori, D.J. Robinson, C.G. Wohl, W.-M. Yao, K. Agashe, G. Aielli, B.C. Allanach et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys., **2020**, 083C01 (2020). DOI: 10.1093/ptep/ptaa104
- [10] Z. Berezhiani, A. Drago, Phys. Lett. B, **473**, 281 (2000). DOI: 10.1016/S0370-2693(99)01449-5
- [11] L.J. Hall, T. Watari, Phys. Rev. D, **70**, 115001 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevD.70.115001